

着衣内空気層における換気性状の CFD 解析

夕部 貴史¹⁾, 高田 暁¹⁾

1) 神戸大学大学院工学研究科

CFD Analysis on Ventilation in Air Layer in Clothing

YUBE Takashi¹⁾, TAKADA Satoru¹⁾

1) Graduate School of Engineering, Kobe University.

Abstract: The ventilation rate of air layer in clothing is calculated by using CFD based on the measured shape data of the air layer obtained by 3D-laser scanner, and the influence of the ventilation on the thermophysiological response of human was estimated by using the human thermal model combined with simultaneous heat and moisture transfer model for clothing. This time, as the first attempt, only the size of the opening was taken into account in the CFD model of air layer in the clothing. For a standard case of young man in summer staying in a room without forced convection, a man model wearing only a T-shirt is focused on in the CFD analysis. The ventilation rate in clothing in case of considering air permeation through cloth was about three times as large as that in case of not considering it. Under the condition of this paper, the influence of ventilation in air layer in clothing on thermophysiological response of human was small.

Key Words: Clothing, Air Layer, Ventilation rate, CFD Analysis, Shape Data

要旨: 着衣内空気層での換気量を求める方法は確立されていない。そこで本研究では、着衣内空気層形状の測定データに基づいた CFD 解析を行うことにより着衣内空気層での換気量を求め、着衣 - 人体非定常熱水分収支モデルを用いて換気による熱水分移動が人体の温熱生理反応に与える影響の評価を行った。今回はこの検討の初期段階として、測定データの開口部の寸法に注目した着衣内空気層のモデル化を行った。着装形態は夏季を想定し裾をズボンに入れずに T シャツを身に付けた状態とし、室内は静穏気流とした。着衣の通気性を考慮する場合の換気量は、通気性を考慮しない場合と比べ約 3 倍となった。また、今回の静穏気流条件では着衣内空気層での換気が人体の温熱生理反応に与える影響は小さかった。

キーワード: 着衣, 空気層, 換気量, 数値流体解析, 形状データ

1. はじめに

皮膚と着衣の間や着衣の間には空気層が存在し、ここでは襟元・袖口・裾などの開口部や衣服面を通した換気が生じている。本研究では、この着衣内空気層での換気が人体の温熱生理反応に与える影響について評価を行うことを目標としている。着衣内空気層における換気性状については繊維分野を中心に様々な実験や数値解析が行われている。実験については、花田ら(1980)により着衣内空気層での気流による影響を考慮した着衣の局所別熱抵抗が求められている。薩本ら(2000)はふいご作用により着衣内空気層で強制対流が生じた場合の着衣の放熱性能における空気層の寸法や通気性の効果について検討している。山田ら(2003)は多点風速計により着衣内空気層での気流速度を測定している。これらの検討からは、着衣内空気層での換気

性状を把握することは困難であると考えられる。佐古井ら(2006)はトレーサガスをを用いた実験を行っているが、ガスの発生・吸引の際に特異な局所気流が生じるため着衣内空気層での気流性状を再現することが困難となる。また、数値解析(秋ら, 1994)(中澤ら, 2004)については複雑な空気層形状に対して実態を再現した数値解析を行うことが困難である。このように、着衣内空気層での換気量を適確に把握するに至った検討は見られない。本研究は、三次元レーザースキャナにより測定された着衣内空気層の形状データに基づいた CFD 解析を行うことにより、実態に即した着衣内空気層の換気量を求めようとするものである。この方法が確立されれば、様々な着装形態に対して空気層での換気量を求め、換気の影響を考慮した人体まわりの熱水分移動の解析が可能になると考えられる。今回は空気

層形状の測定データに基づいた解析の初期段階として、空気層の開口部の寸法に注目したモデル化を行った。着装形態は夏季の青年男子を想定し裾をズボンに入らずにTシャツを身に付けた状態とし、室内は静穏気流の場合を考える。また、着衣内空気層での換気を考慮した着衣-人体熱水分収支モデルを用いて、求めた換気量での換気による熱水分移動が人体の温熱生理反応に与える影響について評価を行う。

2. 解析方法

2.1 解析方法

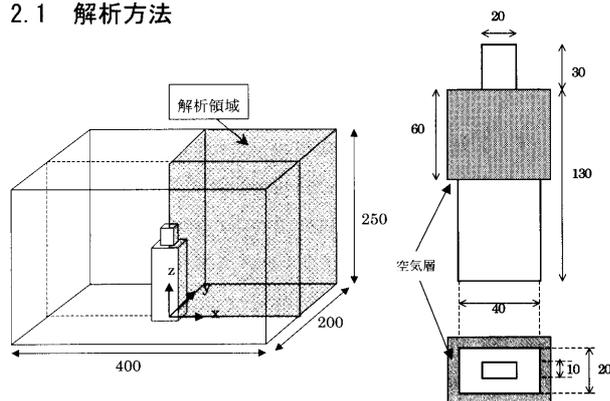


図1 解析対象 (単位: cm)

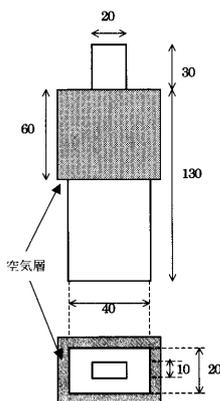


図2 人体のモデル形状 (単位: cm)

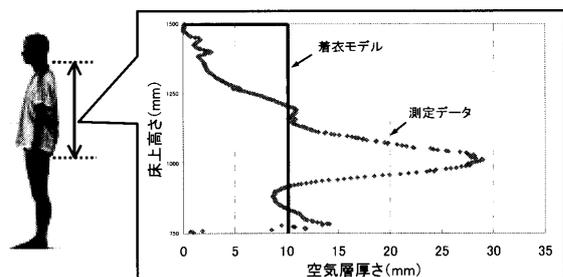


図3 Tシャツを着用した状態のマネキン画像と平均空気層厚さの鉛直分布

解析には三次元熱流体解析ソフトウェア STREAM を用いた。解析対象は、図1のような室(400cm×200cm×250cm)の中央に人を配置したものとす。人体と着衣を図2のようにモデル化した。腕を省略し胴部と足を合わせて一つの直方体で、頭部はそれよりひとまわり小さい直方体で表した。衣服は上半身に一枚Tシャツを着用しているとす、胴部と衣服の間には空気層を設ける。空気層形状は、三次元レーザースキャナにより測定された形状データに基づいたモデル化を行った。用いるデータは20代男性の標準体型を模したマネキンにTシャツを一枚着用させた状態での皮膚と着衣の間の空気層形状を測定したものである(高田ら, 2010)。また、空気層厚さの測定データ(図3)は、空気層断面積を裸体時の周長で割ることにより求めた空気層厚さの水平面上における平均値である。今回は測

定データに基づいた解析の初期段階として、着衣の襟元の上開口部と裾の下開口部の寸法に注目し、下開口部の空気層幅は10mm、襟元は開口がなく上開口部の空気層幅を0mmとした。上開口部から下開口部までの空気層幅は10mm一様とする。着衣の通気性が換気量に与える影響を検討するため、着衣の通気性を考慮する場合としない場合の2ケースについて解析を行う。

2.2 解析条件

解析条件を表1に示す。解析領域は、解析対象がX・Y軸に関して対象であるため解析対象の1/4とする(図1)。固体表面近傍ほど細かいメッシュで分割し、空気層はX、Y方向ともに18分割とし、Z方向に500分割とした。乱流モデルに低Re数型k-εモデル、移流項スキームに1次精度風上差分を用いる。壁面条件は、対称面でフリースリップ、その他の面でノースリップとする。熱移動条件は、流体-固体間で乱流熱伝達(温度の対数則)、固体内で熱伝導とする。解析対象室の温度の境界条件は壁面温度28℃、人体表面温度35℃とする。放射についても考慮している。着衣条件は綿100%のTシャツを対象とする。着衣条件は通気性のある多孔質体と通気性のない固体の2条件とする。通気性のある多孔質体の場合、布内の各方向への空気流動特性は繊維の編み方などにより異なるが、今回は等方向性を仮定した。着衣を通る空気移動を計算する際に用いられる圧力損失係数は通気抵抗度から求めた。ここで通気抵抗度として川端(1988)により提案された方法で井上ら(2004)によって測定されたものを用いる。

表1 解析条件

解析領域	200cm(X)×100cm(Y)×250cm(Z) (室の1/4)	
メッシュ数	300万程度	
乱流モデル	低Re数型k-εモデル	
移流項	1次精度風上差分	
放射	VF法	
壁面条件	【速度】ノースリップ(壁面)、フリースリップ(境界面)	
	【温度】乱流熱伝達(温度の対数則)(流体-固体) 熱伝導(固体内)	
室温条件	壁面温度 28℃	
人体条件	人体表面温度 35℃	
着衣条件	厚さ ¹⁾	1 mm
	比熱 ²⁾	1380 J/(kg·K)
	密度 ¹⁾	150 kg/m ³
	熱伝導率 ²⁾	0.0556 W/(m·K)
	通気抵抗度 ^{1),*1,*2)}	249 Pa·s/m
1)井上ら, 2004 2)高田ら, 2001	圧力損失係数 ^{*1,*2)}	4.15 × 10 ⁵ Pa·m·s/kg
	空隙率 ^{1),*1)}	0.9 [n.d.]

*1 通気抵抗度・圧力損失係数・空隙率は着衣の通気性を考慮する場合のみに用いる

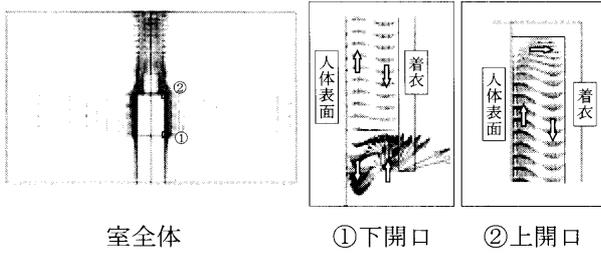
*2 圧力損失係数を用いた圧損失と流速の関係 (毛細管の場合) $\Delta P = \zeta \cdot l \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$

通気抵抗度を用いた圧損失と流速の関係 $\Delta P = R \cdot v$

圧力損失係数と通気抵抗度の関係 $\zeta = \frac{2R}{\rho \cdot l}$

P:圧力 [Pa], l:着衣の厚さ[m], ζ:圧力損失係数[Pa·m·s²/kg], ρ:空気密度 [kg/m³], v:流速[m/s], R:通気抵抗度 [Pa·s/m]

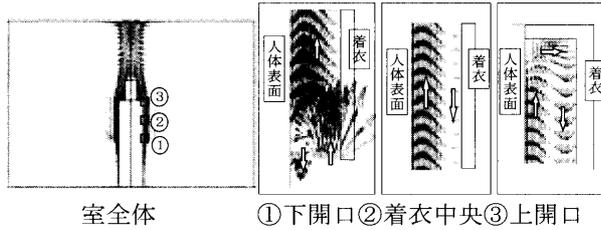
3. 解析結果



室全体 ①下開口 ②上開口

図4 気流分布

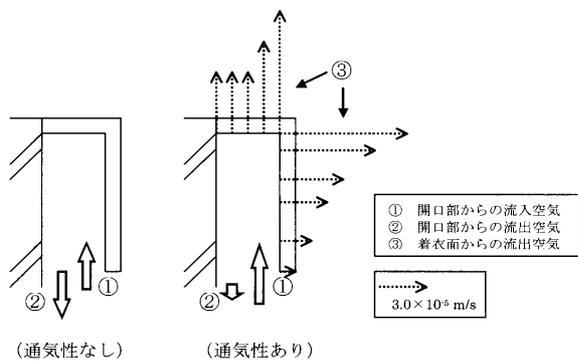
(着衣の通気性を考慮しない場合)



室全体 ①下開口②着衣中央③上開口

図5 気流分布

(着衣の通気性を考慮した場合)



(通気性なし) (通気性あり)

図6 開口部および着衣面での空気移動の概略

表2 開口部および着衣面での流量と換気量

	流入流量 (m ³ /s)		流出流量 (m ³ /s)		換気量 (m ³ /s)
	①開口部	②開口部	③着衣面	④着衣面	
着衣の通気性なし	2.2 × 10 ⁻⁵	2.2 × 10 ⁻⁵			8.8 × 10 ⁻⁵
着衣の通気性あり	7.0 × 10 ⁻⁵	0.88 × 10 ⁻⁵	6.2 × 10 ⁻⁵		2.8 × 10 ⁻⁴

*流量は解析対象の1/4の結果であるため、換気量は求めた流量の4倍とした。

3.1 着衣の通気性を考慮しない場合

室全体の気流分布は、人体の発熱により人体周辺で上昇気流を生じ、人体上方の天井付近で最大流速となる。室のそれ以外の位置ではほぼ無風状態である(図4)。空気層内での気流分布は、下開口部で着衣側から流入し人体側から流出しているが、空気層内では人体側に沿って上昇し着衣側に沿って下降していることが確認できる(図4)。これは、下半身の発熱により生じた上昇気流が下開口部に流入する際、気流速が人体側に比べ着衣側で大きくなるためと考えられる。また、換気量は下開口部での流入の流量から求め、 $8.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ となった(表2)。

3.2 着衣の通気性を考慮する場合

気流分布は着衣の通気性を考慮しない場合と概ね同じ傾向を示しているが、空気層内の着衣に沿った下降流は一部着衣面へ流出するため着衣の下方に行くほど流速は弱くなっている(図5)。衣服面を通した空気移動は全て空気層からの流出を示し、流出流速は $1.0 \times 10^{-4} \sim 8.0 \times 10^{-4}$ となり着衣上方ほど速くなった(図6)。空気層へ流入する気流のほとんどが着衣面から流出している(表2)。また、換気量は下開口部および着衣面での流量から決定した。着衣の布面を通した空気移動を考慮した場合の換気量は $2.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ となり、着衣の通気性を考慮することにより、換気量は通気性を考慮しない場合の約3倍になった(表2)。

3.3 着衣 - 人体非定常熱水分収支モデルによる評価

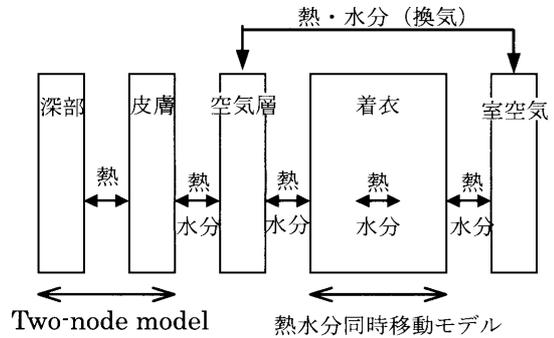


図7 着衣-人体非定常熱水分収支モデル概念図

表3 解析条件

境界条件	28℃・60%		35℃・90%	28℃・60%	
	0min	30min	60min	150min	解析対象
境界条件	空気層	対流熱伝達率 20 [W/(m ² ・K)]			
	(皮膚側・着衣側)	放射熱伝達率 4.65 [W/(m ² ・K)]			
境界条件	室空気側	対流熱伝達率 3.0 [W/(m ² ・K)]			
		放射熱伝達率 4.65 [W/(m ² ・K)]			
*湿気伝達率はルイス関係を用いて求める。					
着衣条件	綿100%のTシャツを想定(詳細は(夕部, 2009)と同様)				

着衣内空気層での換気を考慮した着衣 - 人体非定常熱水分収支モデル(中澤ら, 2004)(夕部ら, 2009)(図7)とCFD解析により求めた着衣内空気層での換気量を用いて、換気による熱水分移動が人体の温熱生理反応に及ぼす影響についての評価を行った。着衣内空気層での換気を考慮しない場合と換気を考慮する場合の2ケースでの被覆部皮膚温の解析結果を比較することにより評価を行う。着衣内空気層での換気を考慮する場合の換気量は、着衣条件について通気性を考慮した場合の結果を用いる。解析条件は表3に示す通りである。発汗過程(0min~60min)での助走計算を行い、解

析対象は汗の蒸発過程 (60min~150min) とする. 着衣の布面を通した空気移動についても, 空気層から直接室空気へ移動するものとして計算を行った.

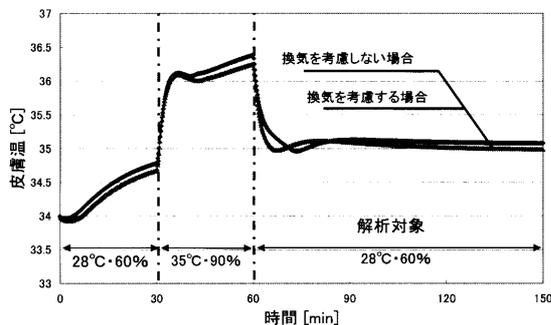


図8 被覆部皮膚温

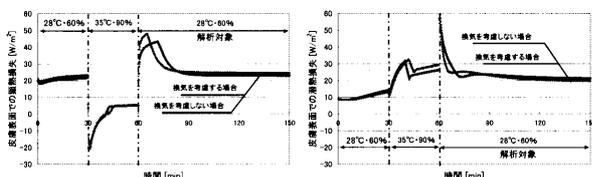


図9 皮膚での顕熱損失

図10 皮膚での潜熱損失

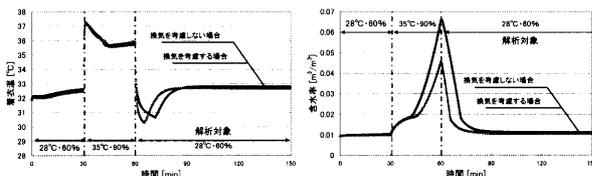


図11 着衣温

図12 着衣含水率

被覆部皮膚温は60min後に急激に低下し, 換気を考慮しない場合は74minに極値をとるが, 換気を考慮する場合は67minで極値をとる(図8). これは60minにおける着衣の含水率が換気を考慮する場合の方が考慮しない場合に比べ低いためであるが(図12), 60min~150minでの換気を考慮する場合と考慮しない場合の被覆部皮膚温の変化を見ると大きな違いは見られない(図8). よって今回の静穏気流条件下では, 着衣内空気層の換気が人体の温熱生理反応に与える影響は小さいと考えられる.

3.4 換気量についての感度解析

着衣内空気層での換気量について感度解析を行った. 解析条件は表3とし, 換気量は換気を考慮しない場合と着衣の通気性を考慮した場合の換気量 ($2.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$) の約2倍, 4倍, 8倍となる, $5.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ の4ケースとした. 換気量が今回求めた値の8倍となる場合では, 着衣内空気層での換気が人体の温熱生理反応に与える影響は無視できないと考えられる(図13).

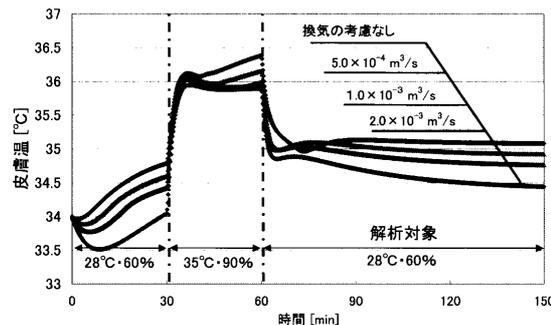


図13 換気量の感度解析(被覆部皮膚温)

4. まとめ

夏季における上半身の代表的着装形態を想定し, 裾をズボン等に入れずにTシャツを身に付けた静穏気流での立位静止状態について人体まわりの数値流体解析を行った. 着衣内空気層形状の実測データに基づいたCFD解析の初期段階として, 開口部の寸法に注目した空気層のモデル化を行った. 空気層での換気量は着衣の布面を通した空気移動を考慮する場合, 布面を通した空気移動を考慮しない場合と比べて約3倍となった. また, 今回の静穏気流条件では着衣内空気層での換気による人体の温熱生理反応に与える影響は小さい.

謝辞: 本研究の一部は, 文部科学省科学研究費 若手研究A(課題番号20686039, 研究代表者: 高田暁)の助成を受けた.

5. 文献

- 花田ら, 1980: 着衣の局所別熱抵抗に関する研究, 日本繊維製品消費科学会, 22, 34/39.
- 薩本ら, 2000: Bellows action (ふいご作用) の着衣の放熱性能への影響, 繊維学会誌, 56, 524/536
- 山田ら, 2003: 衣服内空気層断面における気流の速度分布, J. Text. March. Soc. Japan, 56, No. 8, 52/65
- 佐古井ら, 2006: 衣服内の換気性状解明に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 469/470
- 秋ら, 1994: 人体の着衣との間の微気候に及ぼす空気層厚さの効果, 繊維学会誌, 50, 298/305
- 中澤ら, 2004: 着衣-人体間における熱・水分・空気移動解析のための基礎的検討, 日本建築学会環境系論文集, 580, 23/29
- 高田ら, 2010: 人体熱モデルへの適用を目的とした着衣内熱水分移動モデル, 日本建築学会学術講演梗概集, 604/605
- 川端, 1988: 通気性測定装置の開発とその応用, 繊維学会誌, 40, 59/67
- 高田ら, 2001: 着衣における熱・水分の移動と蓄積を考慮した人体の非定常温熱生理応答, 日本建築学会計画系論文集, 549, 23/30
- 井上ら, 2004: 環境の湿度変化がスポーツウェア着用時における運動時の体温調節反応に及ぼす影響, デザントスポーツ科学, 25, 49/61
- 夕部ら, 2009: 発汗条件における着衣周辺の熱水分移動の解析, 人間-生活シンポジウム報告集, 205/208

<連絡先>

著者名: 夕部 貴史
 住所: 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1
 所属: 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻
 E-mail アドレス: 098t066t@stu.kobe-u.ac.jp